avec de légères modifications postérieures à l'article paru dans *Principia* (1999) en suivant ma traduction en anglais (Paty [2002h]).

Principia (Florianopolis, Br), 3, 1999, n°2 (dezembro), 257-306.

Opérations épistémiques et épistémologie formelle [§]

Contribution à l'étude des opérations épistémiques dans les théories scientifiques

Michel PATY [*]

RESUME

On se propose de cerner les diverses dimensions et les problèmes constitutifs de ce que serait une recherche désignée comme "épistémologie formelle". L'intérêt de ces questions est lié à la possibilité ou non d'un point de vue ou axe de recherche privilégié (celui du "formel"), qui donnerait sur les faits et les problèmes auxquels l'épistémologie précise ("régionale") des théories (par exemple, physiques) se confronte, une *perspective* capable d'en embrasser la richesse et la diversité, tout en saisissant les grands traits structurels qui les organisent selon quelque *intelligibilité d'ensemble*, plus unifiante et synthétique. Un tel point de vue permettrait peut-être de mieux maîtriser les changements requis dans l'organisation des connaissances, d'en souligner les directions principales, d'en dresser l'inventaire raisonné, voire d'en anticiper d'autres.

On aborde en premier lieu la "pensée des changements" que le souci pour la forme ne peut omettre, la signification des formes étant inséparable des contenus, objets de *constructions* et de *modifications.* On examine ensuite la notion d'"opération épistémique" comme instrument de création de formes nouvelles, aux niveaux théorique et méta-théorique. L'analyse s'attache ensuite aux caractères de la *forme* et du *formel* et à leur rapport aux *contenus* de connaissance, ainsi qu'à la notion d'*objet* avec ce qu'elle doit à la décision d'un *sujet* et aux choix de *convention*. On termine en s'interrogeant sur le rapport entre les "opérations épistémiques" ainsi précisées et une *fonction algorithmique* pour des énoncés de connaissance, en soulignant le risque réductionniste d'une conception naturaliste de la représentation.

ABSTRACT. *Epistemic operations and formal epistemology. Contribution to the study of epistemic operations in scientific theories*

We want to investigate the various dimensions and constitutive problems of what a research designated as "formal epistemology" would be. The interest of such questions is related with the possibility or not of getting a privileged *point of view or axis of research* (that of the "formal"), that would afford the facts and problems tackled by precise (regional) epistemology of theories (for example, in physics) a better grasp to their wealth and variety. With such an overall grasp one would eventually be able indeed to hold the main structural lines organizing them according to some

---

[§] Simposio, Revista *Principia* (Forianópolis, Br), augusto de 1998.

[*] Equipe REHSEIS (UPR 318, CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot), 37 rue Jacob, F-75006 Paris, France.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

comprehensive intelligibility, more unifying and synthetic. Such a point of view would possibly allow a better mastership on the changes required in the organization of knowledge, putting emphasis on its main directions, drawing up a rational inventory of these knowledges, and perhaps anticipating others.

We deal first with the "thought of changes" that any concern to the form cannot omit, as the meaning of forms is inseparable from contents bound to *constructions* and *modifications.* We examine then the notion of "epistemic operation" as instrument for creating new forms, at the theoretical and meta-theoretical levels. We subsequently analyze the characteristics of the *form* and of the *formal* and their relationship to *contents* of knowledge, and the notion of *object* as well, depending on the decision of a *subject* and on *conventional* choices. We finally inquire about the link between "epistemic operations" specified as above and algorithmic functions for knowledge statements, and emphazise the risk of reductionnism entailed from a naturalist conception of representation.

RESUMO. *Operações epistémicas e epistemologia formal. Contribuição ao estudo das operações epistémicas nas teorias científicas.*

Nosso objetivo é o de focalizar as differentes dimensões e os problemas constitutivos do que seria uma pesquisa designada "epistemologia formal". O interesse de tais questões esta relacionado com a possibilidade ou não de obter um ponto de vista ou um eixo de pesquisa privilegiado (o do "formal"), que daría sobre os fatos e os problemas aos quais a epistemologia precisa ("regional") das teorias (por exemplo, física) se confronta, uma *perspectiva* capaz de englobar sua riqueza e sua diversidade, apoderando-se ao mesmo tempo dos grandes traços estruturais que os organizam segundo alguma *inteligibilidade de conjunto*, mais unificadora e sintética. Tal ponto de vista permitiría eventualmente de dominar melhor as mudanças necessárias na organização dos conhecimentos, de enfatizar suas principais direções, de estabelecer seu inventário racionalizado, e até de anticipar outros.

Primeiramente trataremos o "pensamento das mudanças" que o cuidado pela forma não pode omitir, uma vez que o significado das formas é inseparavel dos conteúdos, objetos de *construções* et de *modificações.* Examinaremos em seguida a noção de "operação epistémica" como um instrumento de criação de novas formas, aos níveis teórico e meta-teórico. Logo, analizaremos as características da *forma* e do *formal* e a sua relação com os *conteúdos* de conhecimento, bem como a noção de *objeto*, que depende da decisão do *sujet* e das escolhas de *convenção*. Finalmente, nos nos interogaremos sobre a relação entre as "operações epistémicas" acima especificadas, e uma *função algorítmica* para enunciados do conhecimento, sublinhando o risco reducionista de uma concepção naturalista da representação.

MOTS-CLE : Algorithme, Changements, Compréhension, Connaissances, Construction, Convention, Epistémologie, Formalisme, Formalisation, Intelligibilité, Invariance, Invention, Méta-théorique, Nouveauté, Opérations, Rationalité, Réductionnisme, Science, Structure, Sujet, Théories.

KEY WORDS : Algorithm, Changes, Comprehension, Construction, Convention, Epistemology, Formalism, Formalization, Intelligibility, Invariance, Invention, Knowledge, Meta-theoretical, Novelty, Operations, Rationality, Reductionnism, Science, Structure, Subject, Theories, Understanding.

PALAVRAS CHAVES : Algorítmo, Ciência, Comprehenção, Conhecimento, Construção, Convenção, Epistemologia, Estrutúra, Formalismo, Formalização, Intelligibilidade, Invariança, Invenção, Meta-teórico, Mudanças, Novidade, Operações, Rationalidade, Reducionismo, Sujeito, Teorias.

1.

INTRODUCTION.

L'expression "épistémologie formelle" recouvre une variété de définitions possibles, et laisse ouverte une ample marge d'interprétations[1]. On la conçoit, intuitivement, orientée par un intérêt porté aux formes théoriques, à leur signification et à leur portée, concernant un domaine donné ou aussi bien des rapports entre des champs différents de connaissance. Nous ne nous proposons pas tant d'en donner ici une définition précise que de cerner quelques uns des problèmes constitutifs d'une investigation se réclamant d'une telle orientation, et d'en souligner, ce faisant, l'intérêt et les limites.

Nous devons commencer par délimiter ce projet. Il ne s'agit pas ici d'établir une sorte de "morphologie de l'esprit" telle que se la proposa naguère un Ernst Cassirer dans son très bel ouvrage *La philosophie des formes symboliques*[2], prolongeant ses recherches sur la "structure de la pensée" telle qu'elle se révèle dans les mathématiques et les sciences de la nature", exposées dans *Substance et fonction*[3], par une analyse du langage, de la pensée mythique, et de la phénoménologie de la connaissance[4]. Du moins l'idée que la pensée scientifique s'exprime dans des formes symboliques, comme tout autre domaine de la pensée humaine, de son "infrastructure" à cette "organisation architectonique de la ""superstructure" que constitue la science"[5], tout en étant orientée vers le monde réel, demeurera-t-elle, pour nous, une inspiration fondamentale[6].

L'interrogation sur les "formes" et les problèmes "formels", appliquée à des sciences précises, met en général implicitement l'accent sur certains aspects des théories *actuelles*, qu'il s'agit de caractériser. On ne saurait cependant s'en tenir à des traits structurels, statiques, dès lors qu'on s'intéresse, en particulier sous l'angle comparatif, au *mouvement* selon lequel ces aspects "formels" sont établis, et que l'on envisage comment d'autres pourraient s'instituer dans le futur. A s'en tenir au seul examen des formalisations de connaissances récentes, l'on risquerait de perdre la proie pour l'ombre, ne retenant qu'un vue "logico-reconstruite" et schématique des sciences, au détriment de ce qui fait la réalité vivante, et comme la chair même, de ces connaissances, dont les contenus et les formes, fruits d'*élaborations*, subissent régulièrement des *modifications*. Cette "*vie des formes*", pour les sciences comme on le dit pour les arts[7], doit être à l'évidence une

---

[1] Les réflexions qui suivent ont été suscitées par les échanges et débats du groupe de travail dénommé *Centre d'études pour la synthèse d'une épistémologie formelle* (CeSef), animé par Mioara Mugur-Schächter. Je remercie les amis et collègues de ce groupe pour de riches discussions.

[2] Cassirer [1923-1929].

[3] Cassirer [1910].

[4] Objets, respectivement, de chacun des trois volumes de *La philosophie des formes symbolique.*

[5] Cassirer [1923-1929], vol. 3, p. 13-14.

[6] Comme elle nous a aidé à orienter d'autres études antérieures, en particulier *La matière dérobée,* sur les conceptions de la physique contemporaine (Paty [1988a]).

[7] Voir l'ouvrage classique d'Henti Focillon sur l'histoire de l'art, *La vie des formes* (Focillon [1981]). En vérité, les titres de nombreux ouvrages étudiant l'esthétique ou l'art utilisent le mot

dimension constitutive de toute “épistémologie formelle”. Il importait donc d'inventorier cette dimension, tout en restant dans l'esprit d'un approche qui s'attache esssentiellement aux formes, à la “logique des formes”, à leur analyse et à leurs significations, plutôt qu'à leurs circonstances historiques, sans ignorer pour autant la réalité et la nécessité de leurs changements.

C'est donc par une réflexion sur la “pensée des changements” que nous commençons cet essai de problématisation d'une “épistémologie formelle”. Nous examinons ensuite la notion d'“opération épistémique” et les niveaux théorique et méta-théorique où elle se propose comme instrument de création de formes nouvelles. Puis les caractères de la forme et du formel et leur rapport aux contenus de connaissance, ainsi que la notion d'objet avec ce qu'elle doit à la décision d'un sujet et aux choix de convention. Nous terminerons en nous interrogeant sur le rapport entre les “opérations épistémiques” ainsi précisées et la fonction algorithmique pour des énoncés de connaissance, en soulignant le risque réductionniste d'une conception natuuraliste de la représentation.

2.

EPISTEMOLOGIE ET PENSEE DES CHANGEMENTS

Einstein remarquait que les progrès de la physique conduisent à des représentations théoriques de plus en plus éloignées de la forme immédiate de notre appréhension de la réalité. Cela est vrai aussi pour d'autres types de science et de connaissance. Seules peut-être, les disciplines dont le mode d'expression est le récit - et il s'agit essentiellement de l'histoire -, requièrent un type d'intelligibilité qui reste étroitement au contact direct des impressions subjectives et des sensations immédiates, par lesquelles se réactivent les faits d'un passé reconstitué. (Mais cela même n'interdit pas une compréhension informée d'éléments plus abstraits et réfléchis, qui accompagnent les opérations de jugement, les attributions de signification).

Cette distance oblige, pour qui persiste à penser que les élaborations de la connaissance scientifique visent à représenter la *réalité* - la réalité du monde naturel pour les sciences de la nature, la réalité humaine et sociale pour les autres, et c'est encore la réalité du monde[8] -, à prendre en considération les médiations de plus en plus nombreuses qui s'établissent ainsi entre la *pensée représentative* et son *objet*. Les états successifs de ces médiations peuvent être suivies au long de l'histoire : il est possible d'en établir des étapes, pour chacune des connaissances particulières, prise dans une culture d'ensemble et en relation de réciprocité avec elle comme avec l'une ou l'autre des autres connaissances qui lui sont contemporaines.

“forme”. La question du rapport de la forme au sens est évidemment centrale dans le domaine des arts.

[8] Dans le cas des mathématiques il s'agit aussi d'une réalité, mais d'une réalité idéelle. On y décèle aussi une plus grande distance par rapport aux formes intuitives de leurs origines, directement reliées à l'expérience sensible.

A chacune des étapes, ces connaissances et la culture où elles sont insérées forment un tissu organique qui détermine des types ou des normes de compréhension. La question de la compréhension du monde et de la nature de la connaissance scientifique est ainsi inséparable de la considération de leurs états historiques. Cette constatation n'implique pour autant aucun relativisme fondamental qui nierait ou minimiserait la fonction de la raison. On doit admettre comme une vérité de fait des formes de connaissance et des justifications de raisonnement qui diffèrent suivant les époques et les cultures. Mais cette vérité est elle-même susceptible d'une investigation rationnelle, “scientifique”.

Cette remarque, dont on poursuivra ailleurs les implications quant à la nature de la connaissance scientifique[9], n'a pour propos que de souligner l'importance et l'extension de la question des rapports entre une connaissance nouvelle et la “tradition” dans laquelle elle apparaît et, partant, entre connaissance future et connaissance actuelle. Cette question, qui est au soubassement des considérations présentées dans ce qui suit, déborde donc largement le cas de la science que nous connaissons, auquel nous nous restreindrons. Il est cependant fondamental de garder en tête cette dimension et la conscience de ce que la connaissance scientifique dans laquelle nous nous situons ne nous est pas conaturelle, mais résulte d'une élaboration tributaire de circonstances historiques. Nos tentatives d'en donner une représentation purement rationnelle et formelle sont elles-mêmes des constructions, des élaborations qui portent une part de contingence et de convention.

Si la préoccupation pour les aspects structuraux et formels, qui est principalement la notre ici, doit omettre, en première approche, la considération des circonstances historiques, elle doit cependant prendre comme l'une de ses données de départ la nature mouvante ou évolutive des connaissances, c'est-à-dire la question des changements qui affectent non seulement les objets de nos représentations mais aussi les modalités de ces dernières, ainsi que la manière même dont nous les concevons. De tels changements affectent également, et peut-être davantage encore, les autres domaines de la connaissance et de l'expérience humaines qui ne sont pas réductibles à la connaissance scientifique, comme l'esthétique ou la morale, ces autres piliers de toute culture, différemment liés à l'usage de la raison - comme à ces autres fonctions “classiques” de la pensée que sont l'imagination et la mémoire.

Dans de nombreux domaines de la connaissance scientifique contemporaine, les manières de concevoir ce qu'est un phénomène, l'objet auquel il renvoie ou l'explication que l'on s'en donne, diffèrent sensiblement des façons de voir et des pratiques antérieures, y compris celles auxquelles nous-mêmes avons été formés. Cependant, si nous avons conscience de ces changements, puisque nous en faisons l'expérience, nous ne savons pas encore comment les interpréter, c'est-à-dire en quoi et comment ils modifient notre manière établie de penser et parler[10]. Cela serait, certes, *a priori* bien difficile à savoir en restant à l'intérieur de cette pensée “traditionnelle”. Nous vivons ces changements avant de savoir les penser. Il est cependant inévitable pour la science, et essentiel pour la philosophie, d'en venir

[9] Paty [1999a].
[10] Mugur-Schächter (1993, 1995, 1996).

à les penser. Est-il possible, dès à présent, d'en savoir plus, et de formuler la nouvelle pensée requise par les changements que nous vivons aujourd'hui, qui s'accomplissent sous nos yeux ?

Tout le problème est de savoir ce que l'on peut espérer dans cette direction. La situation présente n'est pas entièrement inédite : elle a des précédents, dont il est possible de tirer quelques leçons. Et tout d'abord que la pensée scientifique n'est pas isolée, que les changements épistémiques ne sont pleinement intelligibles que dans un cadre plus général… Egalement, que l'attention à ces changements peut être instructive sans conduire nécessairement à une vue globale. Notre ambition ne peut ici que rester modeste, sans que cela l'empêche pour autant d'être féconde, faute de quoi elle risquerait d'engendrer des illusions.

Mais les modifications des représentations de la science contemporaine sont également riches d'enseignements plus positifs. Nous nous en tiendrons dans ce qui suit à évoquer celles de la physique, mais on pourrait proposer des considérations de nature voisine pour la biologie, la géologie, la cosmologie, les mathématiques, les sciences humaines et sociales. On l'a vu avec la théorie de la relativité, qui a montré la nécessité de reconstruire et de repenser les notions qui paraissaient les plus évidentes et les mieux ancrées dans nos structures cognitives, telles que l'espace et le temps. La théorie de la relativité (restreinte et générale) a aussi montré la nécessité de ré-évaluer ce qu'est une théorie, comme construction symbolique, conceptuelle et formelle, et de penser de manière plus appropriée le rôle particulier des mathématiques - science des pures formes, mais d'un véritable *monde* de ces formes - dans cette construction[11].

La conscience de nécessités de ce genre n'est pas radicalement nouvelle et n'est pas apparue seulement avec la physique contemporaine. Nous savons, certes, que le *continuum spatio-temporel* qui est au soubassement de l'usage des équations différentielles, fondement de toute théorie du champ, est une entité abstraite et construite par la pensée, et que sa justification ne tient pas à une évidence de notre intuition. Cette justification réside pour une part dans le caractère opératoire de cette notion construite, qui permet une description et une explication des phénomènes dans cet ordre. Elle réside, pour une autre part, fondamentale et constitutive, dans la logique d'une représentation mathématisée d'abord de l'espace puis du temps, qui guide nos schèmes d'intelligibilité, et qui est elle-même non pas un *a priori* mais le résultat d'un processus d'élaboration[12].

Cependant, que le continuum d'espace-temps soit une construction mentale, conceptuelle et symbolique, dont rien n'assure que les éléments de base correspondent à quelque chose de véritablement "réel", cela n'est pas vraiment une découverte. On le sait depuis, au moins, la *mécanique du point matériel* et *des quantités différentielles*, fondées sur des grandeurs qui, tout en étant de portée physique, sont *idéelles*, et se présentent comme des *abstractions idéales* de réalités supposées. Cette théorie s'avéra pourtant extrêmement féconde à travers les efforts des physiciens mathématiciens et théoriciens pour dépasser le caractère schématique d'une telle idéalité - commode mathématiquement, sinon toujours claire (quant aux

---

[11] Voir Paty [1988a, 1993].
[12] Paty [1994c].

concepts : point matériel, fluxions et différentielles), et peu *réelle* (au sens des réalités communes). Ils le firent sur la base de la mécanique de Newton, avec ses lois générales ou principes, ses relations et ses concepts, éventuellement reformulés, complétés ou généralisés, en l'étendant aux corps solides et aux fluides, et aux attractions gravitationnelles à plus de deux corps. Mais ils le firent aussi en discutant - préoccupation permanente des savants-épistémologues[13] - les conditions de validité de l'application de ces concepts mathématiques dans la formulation des grandeurs physiques, et leurs limites.

Quant aux changements survenus avec la *physique quantique*, ils sont encore loin d'avoir été pleinement évalués, tant sur le plan de la signification proprement physique de la théorie que sur celui de ses incidences cognitives. Très tôt, des physiciens se sont eux-mêmes préoccupés de généraliser à partir d'elle une méthodologie pour la théorie physique et une philosophie de la connaissance. Mais le souci d'assurer à ces perspectives scientifiques nouvelles et remarquablement fécondes une légitimité qui pouvait leur être contestée fixa prématurément, et de manière rigide, la marge des interprétations. Les difficultés conceptuelles, relevant de l'argumentation physique, de la problématique théorique et de l'analyse épistémologique, furent ensevelies sous les réponses automatiques d'une philosophie taillée sur mesure. Il était, certes, nécessaire de revoir, à la lumière des connaissances du nouveau domaine phénoménal, des catégories dont la fonction semblait acquise, comme celles de *causalité* ou de *déterminisme*, voire celles d'*observation*, d'*objet* et d'*objectivité*. Mais l'on en omettait aussi bien d'autres, et des concepts qui pouvaient être tout autant fondamentaux comme ceux d'*état* d'un système physique ou de *grandeur* pour caractériser un tel état, ou encore la nature de la *probabilité* qui lui est liée. Le formalisme quantique en donnait des définitions mathématiques, mais l'"interprétation" laissait dans l'ombre leur rapport profond avec une signification physique directe, en éliminant d'emblée la pertinence d'une telle question, pour les raisons philosophiques alléguées[14].

Les débats récents sur la signification de la *non-séparabilité locale* des systèmes quantiques[15] et les doutes qui subsistent sur ce qu'est exactement le "principe de réduction du paquet d'onde" (ou *problème quantique de la mesure*[16]) montrent qu'il reste encore des zones d'ombre dans la question de la signification physique des propositions de la théorie quantique. Cette théorie, au demeurant, ne se cantonne pas à la *mécanique quantique*, et s'étend aux *théories quantiques des champs* dont l'importance est aujourd'hui considérable, ce qui ne devrait pas manquer d'entraîner des implications au plan des significations conceptuelles[17].

C'est pourquoi lorsque nous évoquerons les leçons générales à tirer de la physique quantique, nous n'entendrons pas la "philosophie de la mécanique quantique" dans le sens courant de l'expression, qui renvoie à la "complémentarité" de Bohr ou à ses variantes selon d'autres physiciens, dans la mesure où elles

---

[13] De d'Alembert à Mach, Boltzmann, Einstein…
[14] Paty [1999d, h ; à paraître, a].
[15] Cf., p. ex., Bell [1987], Paty [1986], d'Espagnat [1994], Shimony [1993], Cohen, Horne & Stachel [1997a et b].
[16] Cf., en part., Wheeler & Zurek [1983].
[17] Paty [1988a], chap. 8.

mettent aussi la critique théorique et conceptuelle sous la dépendance d'une philosophie de l'observation. Nous entendrons, d'une manière générale, toutes les questions théoriques, épistémologiques et philosophiques suscitées par *la connaissance des phénomènes quantiques*, qui constitue l'un des chapitres les plus importants de la physique actuelle[18].

D'autres théories physiques contemporaines ont d'ailleurs également des implications inhabituelles sur des mises en relation qui semblaient aller de soi, mais qui demandent aussi des évaluations critiques rigoureuses sur la signification des concepts en jeu. Considérons, par exemple, la relation déterminisme-prévision qui n'est plus de mise avec la théorie actuelle des systèmes dynamiques non-linéaires et des phénomènes chaotiques. On devra, dans ce cas, semble-t-il, distinguer la *prévision*, qui concerne la description du parcours par un mobile de sa trajectoire, à l'aide des variables spatio-temporelles - notions qui perdent ici une grande part de leur intérêt -, et la *prédiction*, que la théorie ne manque pas de continuer à permettre, mais pour d'autres variables - globales, par exemple -, et d'autres concepts, tel celui d'"attracteur étrange" en *théorie des systèmes dynamiques*[19] - qui apparaissent caractéristiques de ce genre de phénomènes.

Des ré-évaluations épistémologiques sont ainsi toujours nécessaires si l'on veut comprendre les connaissances nouvelles selon la cohérence d'ensemble d'une intelligibilité plus vaste, cette compréhension plus profonde pouvant aller de pair avec des reformulations. Elles interviennent évidemment après que les connaissances nouvelles aient été instaurées, et résultent d'analyses détaillées, "différentielles", pour chacune de ces connaissances prise dans sa spécificité. On est alors souvent étonné de voir, dans les transformations qui ont eu lieu, pour des domaines de la connaissance parfois fort différents, se manifester des traits de structure à quelques égards semblables. Mais, outre que ces traits ne nous apparaissent que dans l'étude cas par cas, les rapprochements ne nous sont pas immédiatement visibles. Il faut bien des décantations pour qu'ils s'imposent à l'attention. Encore est-on tenté de n'y voir, dans un premier temps, que de simples coïncidences, l'analogie pure et simple apparaissant de toute façon comme un argument bien trop faible pour une prise en considération tant soit peu fondamentale[20].

On peut cependant se demander s'il n'existerait pas un point de vue ou un axe de recherche par rapport auquel l'on aurait pu se placer d'emblée, et qui donnerait sur les faits et les problèmes auxquels l'épistémologie précise ("régionale") de ces théories se confronte, une *perspective* capable d'en embrasser la richesse et la diversité, tout en saisissant les grands traits structurels qui les organisent selon quelque *intelligibilité d'ensemble*, plus unifiante et synthétique. L'acquisition d'un tel point de vue permettrait peut-être de mieux maîtriser les changements requis dans l'organisation des connaissances, d'en souligner les directions principales, d'en dresser l'inventaire raisonné, voire d'en anticiper d'autres.

---

[18] Cf. en part., Paty [1999c, d & h ; à paraître, a & b].
[19] Ruelle [1989, 1991].
[20] Sur l'analogie, voir Paty [à paraître, d].

Une telle anticipation n'est pas impensable, à partir de la constatation de régularités ou de tendances. On peut, en effet, s'interroger sur la raison de telles similitudes, analogies et convergences constatées, dans les transformations survenues dans des régions différentes du savoir, et s'efforcer de les rapporter à quelque trait morphologique qui enveloppait déjà ces connaissances, comme une sorte de conditionnement qui se trouvait posé et déterminé d'avance, sans que nous en eussions eu auparavant conscience, et qui devait nécessairement, en fin de compte, se révéler. Si tel est le cas, un examen antérieur plus systématique aurait peut-être pu le déceler sans qu'il fût besoin d'attendre la réalisation contingente des événements. Ces considérations relèveraient d'une sorte de “meta-épistémologie” encore à inventer, pour autant qu'elle soit seulement possible. Elles seraient, pour l'épistémologie des représentations théoriques, une sorte d'analogue de ce que qu'aurait pu être, aux yeux de Minkowski, une théorie mathématique *a priori* de l'espace-temps si elle avait été développée avant la théorie physique de la relativité restreinte[21]. Remarquons déjà que des hypothèses de ce genre semblent se nourrir d'une conception totalement rationnelle des théories et connaissances considérées, et de leur rapport aux méta-théories susceptibles de les encadrer. Il restera alors, de toutes façons, à préciser ce que l'on doit entendre par “conception rationnelle”, compatible avec une marge nécessairement laissée à l'invention. Ou alors, l'invention ne serait-elle que la voie “pragmatique” d'accès à un progrès des connaissances qui serait inscrit dans une absolue nécessité ?

Quoi qu'il en soit, et sans préjuger à l'avance des réponses à ces questions, de telles considérations suscitent l'idée d'accorder une attention particulière à ce qui, dans ces problèmes de réajustements, mais peut-être aussi déjà au niveau des élaborations elles-mêmes, se présente sous les espèces de l'“opératoire” et du “formel”. Encore faut-il préciser ce que l'on peut entendre par là, avant de poser les jalons d'une réflexion sur ce qu'il est possible d'en attendre.

3.

OPERATIONS EPISTEMIQUES

Nous appellerons “*opération épistémique*” un acte (ou un ensemble d'actes) de pensée par lequel un savoir se constitue, que la nature de cet acte soit consciemment perçue ou non lors de la constitution de ce savoir. Elle peut se laisser reconnaître comme telle à un stade ultérieur de la réflexion, à partir de l'étude des contenus et des procédures de connaissance dans un domaine donné.

Un exemple simple d'opération épistémique, pris dans les méthodes de la physique contemporaine, est la *recherche d'invariants* pour établir une théorie physique : par exemple, un lagrandien invariant de Lorentz pour respecter les exigences de la relativité restreinte, ou invariant sous telle opération de symétrie de jauge posée comme fondamentale pour tel type de dynamique des interactions de

[21] Minkowski [1907, 1908].

"particules" quantiques. Cette pratique des physiciens est devenue courante depuis la théorie de la relativité générale et la physique quantique au cours des années 1920-1930. Mais son origine se trouve dans le mémoire sur "La dynamique de l'électron" composé en 1905 par Poincaré[22], lorsque celui-ci se proposait de construire une théorie de la gravitation modifiée par rapport à celle de Newton par l'imposition de la condition de "covariance", ou invariance des équations qui expriment les lois dans les "transformation de Lorentz" des coordonnées d'espace et de temps, et qui signifie la soumission au principe de relativité restreinte. Elle a partie liée à l'importance prise dès lors en physique par la notion de *groupe de transformation*, *de symétrie* ou *d'invariance*, sous-tendue par la théorie mathématique correspondante.

Cette importance a été pleinement comprise avec la théorie de la relativité générale d'Einstein, et a reçu une première systématisation formelle avec le théorème de Nœther[23]. Elle a ensuite guidé l'édification de la mécanique quantique et celle, ultérieurement, de la théorie quantique des champs, jusqu'aux développements récents qui concernent les champs d'interaction fondamentaux "à symétrie (ou invriance) de jauge".

En s'imposant, cette "opération épistémique" a considérablement modifié la pratique et la conception de la théorie physique. Elle est aisée à formuler, une fois qu'on la sait justifiée ; mais rendre compte de son établissement n'est pas susceptible d'un schème d'explication simple sans distordre ou ignorer la réalité historique, celle des "faits qui résistent". On ne peut la voir comme une évidence naturelle qui s'imposait parce que nous la concevons si bien après coup (après son "invention") sans nécessiter d'autre justification. Si elle s'impose à notre regard rétrospectif, c'est parce que celui-ci se situe dans un univers conceptuel qui l'a prise comme référence, à la suite de réorganisations des connaissances et des méthodes théoriques de la physique. Mais il est possible de cerner son origine dans les changements conceptuels et structurels qu'a connus la physique au début de ce siècle. Elle fut, en premier lieu, *inventée*, dans un univers de la pensée encore marqué par d'autres conceptions et pratiques, et dans des circonstances et pour des raisons qui relèvent de l'étude historique et, plus précisément, de l'épistémologie historique.

Cet exemple nous fait voir assez clairement, grâce à sa relative simplicité, qu'il convient de distinguer *deux niveaux* relativement à l'objet de notre recherche : celui des *opérations épistémiques* dans le *travail scientifique* proprement dit (en l'occurrence, la formation d'invariants pour l'expression des lois et des théories physiques), d'une part, et celui de ces mêmes opérations considérées "au second degré", sous les espèces des *procédures* qui ont abouti à l'énoncé des premières, et dont la formulation implique un aspect historique, d'autre part. Ce deuxième niveau est celui de la *constitution des opérations épistémiques*, au sens de leur réalisation, de leur élaboration, et il est difficilement réductible à des descriptions d'opérations simples. Il se rattache à la question de la formation de conceptions nouvelles, de création, d'une manière générale, de "nouveauté" en science et, en quelque sorte, à la question de l'"émergence" de nouvelles formes

---

[22] Poincaré [1905b].
[23] Nœther [1918a et b].

dans la pensée cognitive.

On peut également considérer comme *opérations épistémiques* le fait de raisonner dans le cadre de certaines structures logiques et de certaines catégories de pensée qui informent nos "interprétations", notre façon de concevoir les "significations" des concepts et des propsitions théoriques. Par exemple, concernant les propositions d'une théorie physique : une conception de la *causalité*, ce que l'on entend par *déterminisme*, notre acception de la notion de *probabilité*. De telles conceptions sont porteuses d'effets sur la manière dont un problème est traité, manière qui peut être commune aux chercheurs et spécialistes à une période donnée, ou qui peut connaître des variantes suivant les individus ou les écoles de pensée. Mais elles concernent plus encore la manière dont ces connaissances sont comprises et justifiées. Or, celle-ci est déterminante sur la dynamique de la pensée qui se propose ou non d'aller plus loin. Par exemple, la notion de "complétude théorique", suscitée par la relativité générale et par la physique quantique, annonce, suivant les positions adoptées à son égard, un programme de recherche pour une théorie physique ultérieure[24]. Aucune des deux n'est une théorie complète *au sens fort*, qui serait celui d'un *auto-engendrement* des qualifications de ses objets, dans la direction d'une clôture théorique, mais qui ne saurait être que relative. Du moins ce sens est-il celui vers lequel on voit tendre les projets actuels de théories unitaires des champs. La question est de savoir si elles le sont *en un sens plus faible* (suffisent-elles pour décrire les propriétés assignables de leurs objets ?)[25] : c'était, pour Einstein, le réquisit de tout point de départ pour aller plus loin dans une description unificatrice des objets physiques.

Les résultats obtenus dans une science peuvent remettre en cause des *opérations épistémiques* que l'on penserait aller de soi. C'est ainsi que la notion de causalité a été modifiée par la théorie de la relativité restreinte qui, en obligeant à distinguer les régions "espace" et "temps" du cône de lumière[26], a entraîné des changements dans notre conception du rapport entre la cause et l'effet. Toutes les régions du diagramme d'espace-temps ne sont pas équivalentes : si la "région temps" est physique, la "région espace" est non physique (il n'existe pas de relation possible de causalité entre ses hyperpoints). Henri Poincaré lui-même l'indiquait, pour ce qui est de ses propres conceptions, à propos de l'espace-temps de Minkowski[27].

D'un autre coté, la notion d'amplitude de probabilité de la mécanique quantique entraîne, à bien y réfléchit, une modification de la conception que nous pouvons nous faire des probabilités dans la théorie physique. Les probabilités sont, sans autre spécification, une notion mathématique. Elles sont généralement

---

[24] Paty [1988b & à paraître, f].

[25] C'était l'essence de l'"argument EPR" (Einstein, Podolsky & Rosen [1935]) ; voir Paty [1995, à paraître, e].

[26] Le cône de lumière, défini par l'équation $x^2+y^2+z^2-c^2t^2=0$, détermine une "région temps", intérieure, telle que $x^2+y^2+z^2<c^2t^2$, et une "région espace", extérieure, telle que $x^2+y^2+z^2>c^2t^2$. La première est celle des relations causales entre les points d'espace-temps, la seconde celle de l'a-causalité (région "non physique").

[27] Poincaré [1912]. Cf. Paty [1996]. C'était peu de temps après que Paul Langevin aît discuté, en sa présence, à des réunions philosophiques, les implications physiques sur la causalité des nouvelles conceptions relativistes (Langevin [1911 a et b] ; cf. Paty [1996a, à paraître, f et g]).

identifiées, dans leur utilisation en physique, à des fréquences d'événements, ou plus exactement, aux limites de telles fréquences, selon la loi des grands nombres. La construction de la théorie quantique les fait intervenir de manière indirecte, par le biais de l'"amplitude de probabilité" qu'est la fonction d'onde ou le vecteur d'état. Cette dénomination rappelle le sens physique d'un concept qui est, en lui-même, étranger à la théorie mathématique des probabilités et qui, du point de vue mathématique, a la forme d'un vecteur d'un espace de Hilbert. L'"amplitude de probabilité" fournit des probabilités théoriques, qui sont mises ensuite en rapport avec des fréquences expérimentales d'événements.

Mais si la théorie fait signifier ses grandeurs (essentiellement par leurs relations) avant la réalisation de l'expérience (laquelle ne nous donne que la connaissance de leurs valeurs particulières), la probabilité obtenue à partir de l'amplitude de probabilité possède un sens théorique qui ne se réduit pas à celui, fréquentiel, du résultat d'une expérience donnée. On peut parler de probabilité pour un événement quantique individuel avec le sens d'un contenu théorique et physique, telle l'interférence d'un photon avec lui-même, comme Dirac le prévoyait dès 1930[28], dans un sens différent de la probabilité d'un coup de dés, qui "s'épuise" en étant jeté. J'entends ici "épuiser" en un sens qui ne préjuge pas de l'indépendance des probabilités de coups successifs : "un coup de dés jamais n'abolira le hasard" (Mallarmé). Je l'entends au sens où un événement singulier, affectant une grandeur classique, se suffit à lui-même. Tandis qu'une mesure d'un processus quantique singulier moyennant l'enregistrement d'un événement de type classique garde entière, comme "virtuelle", la distribution spectrale de probabilités pour la grandeur considérée. Les deux ne viennent en coïncidence, ou plutôt en correspondance, que lorsqu'on s'intéressse aux résultats de mesure pour des grandeurs conçues dans les conditions classiques. Jusqu'à l'instant de la mesure, la probabilité théorique au sens quantique (donnée dans l'amplitude de probabilité) porte toute l'information sur le spectre possible des états de base, avec les probabilités (numériques) correspondantes. La possibilité de la connexion, et le résultat quand elle est réalisée, est parfois exprimée par le terme "potentialité", ou "propensité"[29] qui ne sont, à vrai dire, que des substituts intuitifs d'un saut conceptuel : celui qui existe entre des grandeurs classiques à valeurs numériques et des grandeurs quantiques de forme plus complexe[30].

Nous discuterons plus loin de la question de savoir si les opérations épistémiques sont identifiables à des *algorithmes*. Nous devrons auparavant indiquer ce que nous entendons par le terme "formel" dans l'expression "épistémologie formelle": nous voudrions montrer comment cette notion elle-même déborde largement celle d'algorithme. Nous nous arrêterons également quelque peu sur la notion d'"objet", qui permet de préciser le propos d'une épistémologie formelle par rapport à un trait général des opérations épistémiques.

---

[28] Dirac [1930]. Voir Paty [1999h ; à paraître, a].

[29] Heisenberg parlait de "potentialité", Popper de "propensité" (p. ex., Popper [1935]1968, [1982]). Nous laissons ici de côté les diverses interpretations des probabilités qui ont été proposées dans ce contexte, des "potentialités" de Werner Heisenberg's aux "propensités" de Karl Popper's : remarquons seulement que ces notions, aussi intéressantes soient-elles en ce qu'elles mettent le doigt sur un problème, restent purement "intuitives" et vagues.

[30] Paty [à paraître, c, a & b].

4.

ESSAI DE DEFINITION D'UNE "EPISTEMOLOGIE FORMELLE"

Dans le sens classique, *formel* s'oppose à *matériel*, comme par exemple avec la *cause formelle* aristotélicienne (relative à l'idée ou à l'essence), ou dans le couple antagoniste *forme* et *matière*, ou encore dans l'acception la plus courante du mot "formalisme" (l'expression "purement formel" signifie : sans contenu réel entendu au sens de "matériel")[31]. Cette opposition, exploitée par la scolastique, rapporte à la *forme* le rapport existant entre les termes d'une opération de l'entendement, quelle que soit la *matière*, ou la *signification*, de ces derniers. Ce sens de la forme est à l'origine d'une expression comme celle de *relations formelles*, employée pour l'algèbre, et désignant des relations valables pour tous les nombres que les symboles littéraux désignent[32]. Il informe aussi une terminologie qui désigne les lois - la *forme de la loi* -, et, en philosophie, par exemple dans la philosophie kantienne, les lois de la pensée (*formes pures* de l'intuition sensible ou *formes a priori* de la sensibilité - le temps et l'espace -, *formes de l'entendement* - les catégories -, *formes de la raison* - les idées). Dans un sens différent, plus récent, suscité par la *Gestalttheorie - théorie de la forme* en psychologie -, elle est ce qui oblige à considérer un élément comme partie d'un ensemble, d'une totalité, participant de sa structure et de ses lois.

Nous nous rapprochons, en empruntant à ces diverses acceptions, d'un sens qui puisse nous être directement utile, dépassant l'opposition entre la *forme* et le *contenu*, pour tenter d'atteindre ce qui caractérise fondamentalement l'approche gnosélogique des contenus de connaissance. Gilles-G. Granger parle de "contenus formels" à propos des mathématiques, pour les distinguer des sciences de l'empirie, et en même temps pour les en rapprocher, par la considération qu'elles ne sont pas des formes vides, mais qu'elles aussi ont des *contenus*, qui peuvent être atteints par leurs relations en tant que formes ne se réduisant pas à des tautologies ni à des expressions logiques[33]. Le *formel*, dans cette acception, ne s'identifie pas au purement logique qui est, quant à lui, vide de contenu. Il ne s'oppose pas au *contenu*, et il faudra précisément élucider le rapport du formel et du contenu - certains traits en apparaitront dans la discussion de la notion d'*objet*.

"Formel" s'oppose en fait à quelque chose qui serait de l'ordre du particulier empirique, de la description purement phénoménique d'objets, même si les traits en étaient obtenus par l'approche théorique d'une science de la nature. La *physique mathématique* se présente à bien des égards comme une approche formelle, comparativement à la physique expérimentale bien entendu, mais aussi à

[31] Lalande [1926, 13è éd., de 1980] : articles Cause, Formalisme, Forme, Formel.
[32] "Formel" appelle "actuel" (comme dans le sens ancien et scolastique) et "général" (comme en algèbre).
[33] Granger [1994, 1995].

la *physique théorique* elle-même, qu'elle rejoint cependant assez souvent au point qu'il arrive périodiquement que les deux se confondent (comme dans la mécanique analytique de Lagrange et de Hamilton[34], dans la théorie minkowskienne de la relativité restreinte[35], dans la théorie de la relativité générale, dans certaines présentations de la mécanique quantique (celles de Weyl et de von Neumann notamment[36]) et dans de nombreux développements des théories des champs de jauge (à commencer par les travaux pionniers de Yang et Mills, jusqu'aux rechercches les plus récentes sur la gravitation quantique[37]). Ce qui intéresse la physique mathématique, ce sont les *relations formelles* entre les grandeurs mathématiques supposées concerner la physique. C'est un formel mathématique, par opposition au *contenu physique* dont se préoccupe avant tout la physique théorique. Mais l'opposition n'est que relative, et les identifications périodiques relevées entre la physique mathématique et la physique théorique ne sont jamais que l'indice de ce que, pour "formelles" qu'elle soient eu égard à la nature, les relations mathématiques ne lui sont pas étrangères, dans la mesure où elles constituent la forme même des descriptions qu'en donne la physique théorique. Dans ces circonsstances privilégiées, la *forme* réussit à être l'expression même du *contenu*.

Pour reprendre l'exemple des *invariants* évoqués plus haut, ces derniers sont saisis par la pensée comme des *relations formelles*, mais qui expriment en même temps des propriétés générales et fondamentales des système physiques et des grandeurs qui les décrivent dans la théorie physique. Loin d'être extérieure et superficielle, la *relation formelle* est donc capable d'exprimer des *contenus*, porteurs de significations : elle est un moyen privilégié, voire même parfois le seul moyen, d'exprimer ces dernières. C'est de cette manière qu'un Poincaré considérait les "analogies mathématiques"[38], et un Einstein les "analogies formelles"[39], qui reviennent, en fait, au même (les mathématiques sont le "formel" du physicien). Poincaré et, un peu plus tard, Einstein n'hésitaient pas à parler d'une "*heuristique du formalisme mathématique*", *qui entraîne la pensée physique*, précisément parce que ce formalisme, dans les cas envisagés par eux, était informé, et même imprégné, des significations physiques qu'il servait à exprimer[40].

Cependant, si la nature et le rôle du formalisme en physique mathématique nous donne quelques indices de ce que l'attention au formel n'est pas exclusive des contenus et des significations, cela ne nous dit pas encore ce que l'on devra entendre comme étant le propos d'une "épistémologie formelle".

S'agit-il d'étudier les aspects formels de l'épistémologie comme, par exemple, d'autres étudient sous leurs aspects formels telles réalisations dans un domaine d'expression artistique ? Telle, l'analyse critique littéraire se portant sur la forme dans la poésie de Baudelaire ou dans celle de Mallarmé. Mais on peut aussi concevoir une préoccupation pour la forme qui ne vise pas seulement à décrire ou à

---

[34] Voir Paty [1994b, 1999b].
[35] Minkowski [1907, 1908] ; cf. Walter [1996].
[36] Weyl [1928], von Neumann [1932].
[37] Notamment Ashtekhar [1989]. Cf. Kouneiher [1998].
[38] Poincaré [1897]. Cf. Paty [à paraître, d].
[39] Einstein [1912]. Cf. Paty [1993], chap. 4, p. 164-172
[40] Paty [1993], chap. 5.

caractériser des “styles” de travail ou de pensée existants[41], mais se préoccupe de trouver des formes nouvelles d'expression, ou des manières d'engendrer des contenus nouveaux - voire de nouvelles significations - par une attention privilégiée à la forme, par exemple par l'imposition de *règles formelles* pour la réalisation d'une œuvre. Cette tendance est fréquente daans l'art contemporain, en peinture, en musique ou en littérature. Ou encore de pratiquer un travail sur la forme pour en tirer des expressions inédites, comme les exercices de l'*Oulipo*[42], imposant à l'écriture littéraire ou poétique des contraintes dans la forme[43] qui produisent des innovations esthétiques et des effets de sens.

La *réflexion épistémologique* porte en partie sur des formes, et revêt elle-même des formes qui tiennent à ses modes d'approche et qui sont reliées, de manière sans doute plus directe et contraignante que les formes esthétiques, à des questions de sens : un sens existant préalablement, mais non nécessairement déjà donné, et qu'il s'agit, précisément, de mettre au jour sous les faits et les apparences. Elle n'est pas, assurément, création libre de forme ; étude critique par une pensée d'un “objet” existant en dehors d'elle, à savoir la connaissance scientifique, elle a ceci en commun avec cette dernière que son objet existe en dehors d'elle, et porte des contraintes qui tiennent à cette extériorité. Or, précisément, l'extériorité de l'objet de la connaissance scientifique - y compris les mathématiques - est ce à quoi l'on est en droit de renvoyer principalement les contraintes formelles de ses représentations. Peut-il en aller de même, à quelque degré, avec cette connaissance réflexive de la science qu'est l'épistémologie ? Nous laisserons de coté, pour l'instant (par choix de méthode, comme on sépare par une décision programmatique et “de convention” l'objet et le sujet), la question des contraintes formelles éventuellement imposées en outre par les structures gnoséologiques du sujet connaissant.

Une “épistémologie formelle” doit, en quelque sorte, être en connivence avec son objet, ce qui exclut tout jeu sur des formalismes qui seraient étrangers à ce dernier, ou toute identification avec un formalisme qui ne serait pas directement pertinent (ce qui pose déjà la question des algorithmes et des exercices de pensée avec des modèles arbitraires). Elle peut aussi bien se porter sur l'étude des *formes* (et des *formalismes*) qui caractérisent les connaissances scientifiques que sur celle des opérations par lesquelles ces formes sont établies (opérations que nous avons appelées *épistémiques*). Cela étant, la marge reste encore grande pour définir la, ou les, manière(s) de la pratiquer, ce qui est d'ailleurs un avantage : il reste *a priori* possible de choisir la manière qui nous paraît la plus féconde ou la plus respectueuse de l'objet que l'on a en vue, c'est-à-dire la plus adéquate au but poursuivi.

Par ailleurs, *formel* ne se confond pas avec *quantifié*, comme la mathématisation des grandeurs physiques elle-même nous en informe, en nous

---

[41] Sur la notion de *style* en science, voir Granger [1968], Paty [1990], chapitre 4, [1993a], chapitre 1.

[42] *Ouvroir de littérature potentielle*, créé en 1960, animé notamment par Italo Calvino, François Le Lionnais, Georges Pérec, Raymond Queneau, Jacques Roubaud (Oulipo [1977]).

[43] Voir, p. ex., *La disparition*, de Georges Pérec (Pérec [1969]), roman écrit sans utiliser la lettre *e*, une voyelle pourtant si fréquente….

invitant à distinguer, dans les conséquences de cette mathématisation, le *qualitatif* - entendu au sens moderne, et non à celui d'Aristote et de la scolastique -, dans la *disposition* et l'*ordre de grandeur*, qui réflètent l'*idée conceptuelle*, et la *quantité*, dont les renseignements sont d'une autre nature[44]. Et encore, *formalisation* ne veut pas dire schématisation - de même que décrire théoriquement la forme d'un animal n'est pas le réduire à son squelette -, mais concerne le fait et la façon de *prendre une forme*. La question de la *forme* sous laquelle se présente *le fait* de la connaissance scientifique et des sciences particulières, constituées et se constituant, laisse voir que la forme a à voir avec l'*intelligibilité*.

Quelle intelligibilité telle connaissance scientifique donne-t-elle dans la forme qu'elle prend ? Par ailleurs, s'il existe une relation étroite entre *forme* et *structure*, il apparaît également souhaitable de distinguer les deux, *forme* étant plus délié, élastique et maniable que *structure*[45]. La forme est l'expression de la structure, mais pour une part seulement : elle exprime d'autres traits, compatibles avec elle. D'autre part, un même ensemble de connaissances peut revêtir des formes différentes, et l'on peut se demander s'il y correspond des intelligibilités différentes. Cette question, liée à celle des "interprétations", apparaît en fait fondamentale : on peut y voir l'une des articulations-clés d'une "épistémologie formelle".

"Epistémologie de la connaissance formelle", "épistémologie de la forme", "épistémologie formelle"… Cette approche métascientifique de la fonction de la forme dans la connaissance peut être vue comme une méthodologie par son parti-pris heuristique. Reste à savoir dans quelle mesure elle peut prétendre mettre au jour des normes de raisonnement, par exemple de conceptualisation, susceptibles de reproduire ou d'anticiper des *inventions* (qui sont précisément des *inventions de formes*). Cela n'est pas évident *a priori* étant donné ce que nous savons jusqu'ici de la compréhension et de la création de concepts. Repenser un concept, c'est d'une certains manière le recréer, et cela se produit dans l'unité d'une pensée singulière, subjective - considérant ici la subjectivité dans le sens épistémique en tant qu'elle est le lieu des actes de raison.

Ces raisonnements créateurs de formes neuves ne mettent pas en œuvre que des règles, dénombrables et dont on pourrait dresser une typologie, mais s'inscrivent à l'intérieur d'une conscience qui mobilise, dans les actes de l'entendement, bien d'autres instances que les seuls éléments identifiés des questions à résoudre. Par ces autres instances, on n'entendra pas tant la psychologie ou la sociologie, dont on doit s'abstraire dans la considération du formel qui nous occupe ici - c'est une règle à respecter en épistémologie également quand on s'attache aux contenus scientifiques des concepts et des théories -, que des facteurs non explicités et d'ailleurs généralement non conscients, qui participent aussi de l'économie des actes de raison[46].

---

[44] Cf. Paty [1994a].

[45] Sur la *structure* en science, cf. par ex., Stegmuller [1973, 1979]. Sur la structure pour l'histoire, cf. Foucault [1969], Veyne [1971, 1978], et, pour les représentations anthropologiques, Levi-Strauss [1958].

[46] Voir, sur l'invention scientifique, Hadamard [1945], et, sur la rationalité de cette invention chez plusieurs savants, Paty [1999e].

Nous sommes par là amenés à situer l'*épistémologie formelle* et les *opérations épistémiques* par rapport aux *jugements* et aux *décisions* (ou aux *choix*) posés par le sujet de la connaissance, en tant qu'il est *sujet épistémique*, et donc à préciser ce qu'il reste du sujet - lieu unique de l'intelligibilité - pour une connaissance "objective" qui veut abstraire par principe la singularité du subjectif en se voulant seulement *opération*, *processus* et *contenu*, "sans sujet". Si c'est par des *actes de création et de jugement* que la connaissance s'établit, s'évalue, se communique, un *sujet* comme *centre de ces actes* est indéniablement requis par une épistémologie, même formelle. Sans quoi la connaissance porterait sur *des contenus sans l'intelligibilité* ou, au mieux, selon une intelligibilité anonyme et abstraite : mais on est en droit de se demander si la notion même de *contenu* serait alors seulement concevable. Un contenu de connaissance pourrait-il être seulement schématique ?

La présence en filigrane d'un sujet se révèle sous quelques éléments qui, en amont comme en aval de toute connaissance, qualifient les conditions, les effets ou les modalités de ces actes. Nous ne faisons ici que les mentionner, et leur étude appartient à l'épistémologie dans le sens général, structural ou historique : conditions de possibilité[47], champs de rationalité, styles, programmes, intelligibilité, intuition…[48]. La différence, ici, entre l'épistémologie formelle et l'épistémologie dans le sens général est que, si la seconde les prend comme objets de son étude, la première en tiendra seulement compte comme un donné conditionnant qu'elle prétend transcender ou, plus exactement, par rapport auquel elle se situe en recherchant des "invariants" structurels.

5.

OBJET ET CONVENTION

L'examen d'opérations épistémiques amène, comme le fait, de son coté, l'épistémologie dans le sens courant, à déceler, dans les opérations de connaissance, une part préliminaire d'organisation par l'entendement, qui "prépare" l'objet de connaissance, ou plutôt les conditions de l'identification de ce dernier[49].

L'ensemble des sciences, exactes, de la nature ou sociales, ont aujourd'hui conscience de la nécessité d'une *critique de la notion d'objet*, en particulier par la prise en compte de ce que cet *objet* est défini par une séparation d'avec le *sujet* qui le pose : la critique de la notion d'objet entraîne, corrélativement, celle de la notion d'*objectivité*. D'une part, il n'est pas d'objet qui soit désigné en-dehors d'un *acte mental* ou d'une *intention du sujet*. D'autre part, tout objet est

---

[47] Kant [1781-1987].
[48] Granger [1968], Lakatos [1970], Zahar [1989], chap. 1, Paty [1988, 1990, 1993], ….
[49] Le terme de "préparation", relevé à juste titre par M. Mugur-Schächter (*op. cit.*), vient de la mécanique quantique. Mais la conscience de cette procédure universelle se trouve dans des réflexions épistémologiques antérieures, auxquelles la mécanique quantique a contribué à donner un accent particulier, et une précision plus grande (voir, en part., Margenau (1978)).

défini par sa *distinction* ou sa séparation *d'avec un fond* sur lequel il se détache. On sait aussi que toute science est tenue de ne pas se limiter, quant à la conceptualisation de ses objets, aux caractères que leur affecte le *sens commun* : ici encore, la physique quantique a permis de tirer des leçons particulièrement précises, auxquelles nous renvoyons sans pouvoir les détailler[50].

On a souvent voulu voir une "désontologisation" des sciences dans la transformation d'*objets* en *relations*, caractéristique des *mathématiques*, surtout depuis leur abandon d'une conception unique de la géométrie, mais aussi de la *physique* dès lors que la théorie physique est mathématisée et prend même, comme elle le fait de plus en plus, la forme d'une physique mathématique. Mais la notion d'*objet* n'est pas abolie dans celle de simple *relation*. Qui dit, en effet, relations dit *éléments* entre lesquels jouent ces relations : pour relier, il faut bien *quelque chose* - disons : des "éléments" - *à relier*, même si la nature de tels "éléments" est problématique. Du moins sont-ils les "objets" de la relation, et c'est ainsi que l'on tend désormais à concevoir la notion même d'objet, en mathématiques, mais aussi bien en physique.

Il est vrai, cependant, que le mouvement de mise en relation progressant avec la formalisation et l'abstraction des théories, les *éléments* mêmes ou "objets" des relations se transforment à leur tour en d'autres *relations*, au moins pour une part. Les *éléments* peuvent être, et sont, en vérité, dans une théorie mathématique ou physique "complète" même au sens faible évoqué plus haut, *donnés dans et par la relation* elle-même (tel est le cas, de façon éminente, avec la théorie quantique). Mais, dans la mesure où le système de ces relations n'est pas transparent ou tautologique, il exprime un contenu structuré "qui résiste" à la dissolution dans le "relationnel pur" (encore faudrait-il préciser ce qu'on entend par là : par exemple, des rapports simples). Ce contenu qui résiste et qui demande, pour être connu, d'être exploré, possède donc un attribut que l'on rapporte en général à une "réalité". L'exemple, à première vue élémentaire, du système des nombres entiers, peut immédiatement faire voir cette complexité des relations, cette "réalité" d'un certain ordre qui les sous-tend. Même en engendrant l'ensemble des nombres entiers à partir de 1 par la *répétition* cumulative de l'*addition* d'une unité, on ne peut connaître à l'avance toutes leurs propriétés, par exemple lesquels sont des nombres premiers et les relations entre ceux-ci (comme le grand théorème de Fermat). Mais c'est aussi que la *répétition* d'*additions* élémentaires dans la relation génératrice implique que l'on traite non seulement de nombres mais de nombres d'opérateurs sur ces nombres…, et que le mode d'engendrement n'était simple qu'en apparence. (On remarquera que la *relation* est ainsi inhérente au mode d'*engendrement* des nombres, et donc à l'"essence" de ces derniers).

La physique fournit aussi de bons exemples. Prenons le concept de *champ*, une fois débarrassé par la théorie de la relativité restreinte du support "matériel" ou "objectal" de l'éther : il n'est défini physiquement que par les *équations de champ*. Ou encore l'indiscernabilité des systèmes ou "particules" quantiques identiques, qui définit *en même temps la relation et l'objet de cette relation*, et les symétries des particules élémentaires qui déterminent celles-ci dans

---

[50] Paty [1988, 1986, 1999d].

leurs relations entre elles à travers leurs champs d'interaction (champs de jauge)[51].

Peut-être serait-il alors plus juste de dire que c'est *ce relationnel même* qui est devenu "*aussi concret que du réel*". Si la transformation toujours possible d'éléments en d'autres, plus relationnels, relativise leur nature "objectale", il reste que leur relation étroite entre eux se présente elle-même en fin de compte comme ayant tous les caractères de ce que l'on conçoit comme un "objet", doué d'une consistance propre. Un noyau de relations de structure étroitement tissé ne laisse rien à désirer à la notion d'objet, une fois celle-ci débarassée des "substances" des anciennes métaphysiques. L'objet, mathématique ou physique (et, par extension, chimique, biologique …), perd ainsi sa relation traditionnelle avec une perspective directement ontologique. La catégorie d'"être" à son propos est, sinon effacée, du moins mises à distance par les médiations relationnelles. Mais les prédicats d'existence, quant à eux, demeurent, leurs critères étant de nature épistémologique.

Les ambiguïtés du mot "ontologie" ne justifient donc pas d'abandonner la notion d'"objet". D'ailleurs, une représentation ou une théorie est toujours représentation ou théorie *de quelque chose* : par définition, ce "quelque chose", dont la nécessité est ici d'ordre logique, est l'*objet*, que désigne cette théorie. En ayant déjà orienté la représentation ou la théorie en question, on a qualifié d'une certaine manière cet objet. Il est clair que c'est par *un acte de la pensée* que nous l'avons ainsi désigné pour être décrit par la représentation ou la théorie. Il y a, dans cet acte, un *choix*, qui le sépare du "reste", et ce choix, qui indique un programme, comporte une part de *convention*, que l'objet porte donc avec lui. La conception de *l'objectivité* en reçoit corrélativement l'effet : elle n'est pas seulement *donnée* (par l'entraînement de l'objet sur la pensée), mais *décidée* (selon certaines normes ou conditions) et *construite* (en relation à nos choix pour établir l'objet).

La convention choisie dépend des concepts et du système théorique qui les tisse entre eux pour décrire l'objet. Elle est relative à ce système, et des conventions alternatives sont pensables, qui ne portent pas seulement sur la théorie, mais sur l'ensemble des éléments de signification qui inscrivent la théorie dans une certaine intelligibilité, dont les critères sont eux-mêmes en partie méta-théoriques. Il importe d'étudier de manière précise le jeu de ces deux notions, *objet* et *convention*, qui appellent des exigences de nature différente en relation aux types de théories représentatives que l'on peut considérer.

Nous n'en dirons encore ici que quelques mots. On crédite souvent la mécanique quantique d'avoir éliminé la notion d'objet, du moins en tant que ce dernier serait pensé indépendamment de tout acte d'observation et de conceptualisation et préexisterait à de tels actes. Il est certain - et communément admis, en fait, comme nous l'avons dit, bien au-delà de la physique quantique - que l'objet n'est tel que parce qu'une opération de l'esprit l'a séparé du reste, ou a préparé les conditions de sa séparation. Mais cette "condition de possibilité" de la pensée de l'objet n'épuise pas la description que l'on peut en faire : au contraire, elle la rend possible et ouvre le champ de sa réalisation.

On peut considérer, à ce propos, que le problème propre à la *mécanique quantique* est celui de la nature des actes - de pensée et d'opérations - requis pour

---

[51] Paty [1999c, h ; à paraître, a].

accéder à la description de l'objet, ou, plus exactement, de son *état*. J'ai tenté ailleurs - et ne peux m'y étendre ici - de montrer, dans cette perspective, que les sytèmes quantiques et leurs états peuvent être conçus en termes d'*objets* doués de *propriétés*, moyennant une extension de sens, déjà réalisée dans la compréhension pratique des physiciens, mais non encore explicitement admise, des notions de *grandeur physique* et de *fonction d'état* pour un système décrit par ces grandeurs, au-delà de leur acception usuelle de *quantité à valeur directement numérique*[52]. Je noterai encore seulement que l'on pourrait retrouver, en amont de la physique quantique, des circonstances où les "objets", représentés par des grandeurs abstraites, avaient déjà perdu les qualités habituellement attribuées par le sens commun (déjà l'onde lumineuse, répandue dans tout l'espace, ou le champ sans le support de l'éther, évoqué ci-dessus). Observons encore que la notion de fonction d'état, qui intervient déjà dans la mécanique de Hamilton, fut suscitée chez ce dernier par l'optique et par l'application d'un principe de minimisation - autre opération épistémique qui renvoie à une origine plus lointaine -, en mécanique comme en optique, à savoir le principe de moindre action.

Reste, du moins, ceci : on a su construire une représentation qui peut être dite correspondre à un genre d'objet, sans en connaître pour autant la justification profonde - sinon le fait qu'elle est opératoire. (J'entends par là qu'elle suffit à tout ce dont on a besoin pour décrire l'objet et les phénomènes qui se rapportent à lui. Mais ce que nous savons, c'est que les difficultés épistémologiques éventuelles résident plutôt au niveau de l'*outil* - conceptuel et théorique -, que de la nature de l'*objet* dont la théorie nous importe. En fait, l'outil a été ajusté en fonction de l'objet qu'il devait nous donner à voir : non pas directement, mais par la construction, grâce à sa médiation, d'une théorie apte à le représenter.

L'*outil opératoire* qu'est la règle, ou l'algorithme, quantique a été forgé et mis au point par adaptation à la nécessité de représenter un monde cohérent d'objets - le monde des objets quantiques - capable de rendre compte des phénomènes quantiques. L'outil et les éléments de la représentation sont - par la logique de leur fabrication - faits d'une même étoffe. Et le formalisme des fonctions d'état définies dans des espaces de Hilbert et des opérateurs agissant sur elles, pour représenter des systèmes quantiques, s'accompagne de sa règle, par construction. Mais à leur niveau, dans le jeu de relations de leur monde, les "objet" que désignent ces fonctions d'état - c'est-à-dire les systèmes quantiques - n'ont pas besoin, pour être pensés, d'être à chaque instant rapportés à l'outil qui après les avoir construits les détecte, c'est-à-dire à la règle, en termes de probabilités et de réduction. Ils sont de fait pensés selon ce qui les désigne, c'est-à-dire le formalisme théorique lui-même[53]. En un sens, la question de la nature de l'outil ne se rapporte pas tant à l'objet quantique représenté, qu'au rapport entre la représentation quantique et la représentation classique adaptée aux dispositifs des expériences[54].

Ces remarques laisssent entendre un mouvement pour ainsi dire inverse de la "*syntaxisation progressive de la sémantique*", par laquelle on exprime, dans les termes d'une philosophie du langage, la mathématisation du contenu physique,

[52] Paty [1999h ; à paraître, a, c].
[53] C'est ainsi que l'on peut "penser la non-séparabilité quantique" (Paty [1986]).
[54] Paty [à paraître, b].

ou la transformation de l'objet dans la relation[55]. Si l'on considère l'évolution effective de la question de l'interprétation de la mécanique quantique, depuis les premiers débats, suivis d'une familiarisation acquise par les physiciens dans ce domaine, et jusqu'aux connaissances récentes et aux réinterprétations que l'on peut formuler, il est possible de parler d'*une sémantisation de la syntaxe*. La description des systèmes physiques quantiques n'était conçue auparavant que selon des opérations, alors qu'elle peut être donnée désormais, selon ce que nous venons de suggérer, en termes de systèmes physiques, conçus comme des *objets ayant des propriétés* (moyennant, certes, des transformations dans nos définitions des grandeurs servant à les décrire).

La "syntaxe" précédente restait extérieure au contenu physique proprement dit, puisqu'elle se cantonnait aux moyens formels de la description, sans se prononcer sur l'existence physique de ces systèmes. Faire aboutir pleinement *le programme de sémantisation de la théorie* serait formuler la théorie quantique comme la théorie d'une catégorie d'objets physiques et de leurs propriétés. Ce serait une tâche nécessaire avant de repartir vers de nouvelles syntaxisations proprement physiques. (Il faudrait pouvoir remplacer la formulation axiomatique à la von Neumann[56], en termes de règles d'utilisation du formalisme, par une nouvelle formulation axiomatique équivalente en termes de propriétés physiques concernant le niveau quantique).

6.

ALGORITHME ET REDUCTION NATURALISTE DE LA REPRESENTATION

La notion d'*opération épistémique* pose naturellement le problème de savoir dans quelle mesure de telles opérations peuvent être algorithmiques. On peut le concevoir quand il s'agit d'opérations simples du travail scientifique, comme le cas mentionné plus haut d'une recherche d'invariants, par exemple. Encore que, si l'on peut concevoir algorithmiquement un invariant déjà connu, il ne soit pas évident de concevoir un algorithme pour la recherche d'invariants. Pour des opérations complexes portant sur l'acquisation de connaissances plus détaillées, la réponse est autrement délicate, et sur cette possibilité les avis diffèrent. Les adeptes de l'intelligence artificielle répondront volontiers par l'affirmative. A terme, selon eux, toutes les opérations cognitives, y compris l'invention scientifique, pourront être reconstituées : ils nous en proposent déjà de nombreux modèles pour des situations relativement simples, en en proclamant l'évidente nécessité de principe dans tous les cas, et renvoient les sceptiques à l'ancien et archaïque dualisme de la matière et de l'esprit[57]. Le cerveau, disent-ils, est-il autre chose qu'une machine (une machine neuronale, bien entendu) ?

---

[55] L'expression est de Cassirer, cf. Cassirer [1910]. Voir Granger [1994].
[56] Neumann [1932].
[57] Changeux [1983], Damasio [1994].

On peut, certes, juger que cette question a, par un certain coté, des antécédents. La recherche cartésienne d'une méthode pour parvenir à une connaissance certaine, ou celle, leibnizienne, d'une caractéristique universelle permettant de formuler en un langage unique et parfaitement logique la totalité des connaissances, et même le parti pris de démonstration *more geometrico* des propositions de l'*Ethique* chez Spinoza, pour ne pas remonter à Aristote, témoignent pour la permanence d'une préoccupation assez voisine en philosophie, du moins quant à la possibilité d'un algorithme puissant susceptible de fonder et de rassembler et d'organiser les connaissances "vraies". Ce désir de synthèse par une unité formelle n'était pas nécessairement réducteur : il était protégé, chez Descartes, par le dualisme de la matière agie et de l'esprit pensant, et le monisme spinozien laissait toute leur place aux spécificités des diverses sciences. La tendance paraît tout autre dans le cas de la conception moderne du cerveau comme machine : il n'y est pas seulement question, en effet, d'un algorithme de la représentation, qui en resterait à l'intérieur de cette dernière, mais de sa réduction naturaliste[58] - sur laquelle nous ne pouvons nous étendre ici.

La revendication d'algorithmes pour la connaissance scientifique a pu se trouver renforcée en notre temps par les conceptions logicistes des philosophes des cercles de Vienne et de Berlin[59] et de leurs successeurs, dissidents ou non, jusquà la philosophie analytique[60]. Pour les positivistes et empiristes logiques, la science devait engendrer une philosophie pour ainsi dire obligée de la connaissance (la "philosophie scientifique", exprimée et soutenue par Hans Reichenbach[61]), entée sur le donné de l'expérience pris pour référence fondamentale. La recherche, avec Rudolf Carnap d'une logique de l'induction, celle-ci fût-elle seulement probabiliste[62], se fonde sur l'idée que la connaissance peut être ramenée à une règle, valable en tous lieux, voire en tous temps, qu'il s'agirait de découvrir : ce qui est bien penser la connaissance scientifique sur un mode algorithmique. L'affirmation d'une confiance dans la méthodologie[63], et l'idée de la légitimité normative d'une "reconstruction rationnelle" de la connaissance scientifique (Reichenbach, Popper[64]), qui permet de corriger les irrationalités de l'intervention du sujet dans une connaissance à vocation objective, c'est-à-dire, en fait, "sans sujet", vont également dans le même sens.

On peut aussi considérer comme un indice ou un effet de cette vue le "troisième monde" poppérien des formes de connaissance objective[65] : cet univers impersonnel d'idées est supposé être celui de la pure rationalité, débarrassé des affects et du hasard, et même de la matérialité (renvoyés les uns au "second", l'autre au "premier monde"). Ce monde de formes créées, sans l'acte de création, tient de

---

[58] Voir le dialogue fort intéressant de Jean-Pierre Changeux et Paul Ricœur (Changeux & Ricœur [1998]).
[59] Wiener Kreis [1929], Hahn, Neurath & Carnap [1929], Soulez [1986].
[60] Voir l'étude de Joëlle Proust sur les "questions de forme", de la logique et des propositions analytiques, de Kant à Carnap (Proust [1986])
[61] Reichenbach [1951, 1959].
[62] Carnap [1935, 1950], Jeffrey [1980].
[63] Bunge [1983]. Alberto Cupani (Cupani [1998]) rappelle cependant à juste titre que, pour Bunge, la méthode n'est pas une "recette", d'application mécanique.
[64] Reichenbach [1938, 1951, 1959, 1978], Popper [1935, 1972].
[65] Popper [1972], p. 154.

la réserve ou du musée : un “musée des idées”, “virtuel” avant la lettre, où l'on puise pour formuler d'autres idées, et concevable seulement en relation aux deux autres mondes. Cette conception recèle, me semble-t-il, l'idée plutôt platonicienne de purifier le monde des idées par rapport aux instances périssables, matière, chair, affects et sentiments, qui font le sujet individuel, tout en protégeant une logique de la reconstruction qui n'est pas très différente de la fonction algorithmique.

Cela dit, on reconnaîtra qu'un algorithme du genre évoqué pour la connaissance n'est pas identifiable *per ipse* à une machine, parce qu'il ne se recouvre pas nécessairement avec l'idée de reproduire la totalité des opérations de la connaissance. On doit compter encore avec un élargissement de la notion de machine, incluant la possibilité d'apparition de formes ou de propriétés *émergentes*, concernant aussi bien les systèmes matériels que la nouveauté surgie dans l'espace des idées. Mais l'invocation d'un algorithme puissant ou d'une machine, même aux propriétés organiques, pour reproduire ou décrire le processus d'acquisition d'une représentation fondamentalement nouvelle suscite des réserves, sans besoin d'invoquer nul dualisme et en maintenant au contraire une position ontologiquement moniste : ces réserves sont du même ordre que celles que l'on oppose au réductionnisme et à une conception naturaliste de la connaissance et des valeurs. On peut les émettre sans dénier pour autant tout intérêt aux “opérations épistémiques”.

Il est possible de concevoir une opération épistémique à l'origine d'un algorithme, tel que les invariants considérés plus haut ou - autre exemple - le calcul différentiel leibnizien et, une fois l'algorithme inventé, de réorganiser ou de reconstituer avec son aide toutes les propriétés, connues ou prédictibles, d'une représentation dans un référentiel de significations choisi. L'algorithme peut manifester sa fécondité dans la résolution de problèmes multiples, voire contribuer à poser de nouveaux problèmes et à les résoudre. Mais peut-il faire jaillir, par lui-même, une propriété ou une connaissance qualitativement nouvelles ? Cela ne paraît logiquement possible que si l'algorithme contient en lui-même cette rupture par rapport à ses antécédents qui fait le neuf. Mais ne sera-t-on pas sorti, dès lors, du cadre balisé des “opérations épistémiques” formulables ?

La machine à produire du “conceptuellement neuf” reste, à notre connaissance, encore à inventer. Cela étant, doit-on considérer une telle éventualité comme absolument impensable pour le futur ? La question, à laquelle l'“intelligence artificielle”, voudrait donner une réponse positive, dépend de ce que l'on peut appeler “qualitativement nouveau” : cette caractéristique échappe, à tout le moins, au contenu proprement dit - c'est-à-dire interne -, d'une connaissance, se rapportant à son cadre de pensée et se situant dans l'univers des significations. Il est difficile d'imaginer l'existence, ou même seulement la possibilité, d'une “machine à faire du sens”, dans l'acception commune de ces termes, du moins sans une pensée qui soit à l'origine de ce sens ou qui puisse le “lire”.

L'évaluation des concepts et de leur éventuel caractère de nouveauté est de l'ordre de la signification, et c'est, jusqu'à nouvel ordre, la pensée humaine, fruit d'un cerveau inséparable d'un corps et d'une pratique de vie, s'imposant à elle-même des buts, par volonté ou par désirs, qui impose ses significations à la machine. Une “machine à faire du sens” devrait posséder ces propriétés-là, et assurément d'autres encore, incluant les sentiments et la psychologie : une telle

machine ressemblerait alors étonnamment à l'homme en société, dont la mise au point par la nature résulte d'une très longue - et peut-être improbable - histoire et dont l'origine se perd dans la nuit des temps : l'histoire des maturations, des renouvellements, des transmissions et des échanges, résultant de la diversification du phylum humain, social et culturel, et du hasard des accidents.

En sorte que la question de fond se ramène à celle-ci : est-il possible de penser un algorithme capable d'engendrer, pour la connaissance, une signification différente de celles qui nous sont disponibles mais qui puisse nous apparaître tout aussi légitime, voire plus certaine ? Il semble que l'on entre, avec ce type de problèmes, dans une chaîne sans fin d'implications et une multiplicité infinie de voies ouvertes que la machine aura grand mal à résoudre.

La pensée humaine, au contraire, qui est certes issue de la matière, ne calcule pas toutes les possibilités comme la machine mais coupe à travers les combinaisons offertes et fait des choix bien avant d'avoir épuisé toutes les possibilités[66]. Elle pose, tout simplement, la signification qui lui fait apparaître - selon son jugement, qui n'est peut-être subjectif qu'en un certain sens - la clarté soudaine d'une intelligibilité. Celle-ci, qu'elle soit évidence cartésienne, connaissance du troisième genre spinozienne, illumination de l'intuition pour Poincaré, Einstein et d'autres penseurs contemporains, semble destinée à échapper durablement à la description réductrice. C'est que cette intelligibilité doit faire appel, si elle veut se fonder, à d'autres dans une chaîne régressive sans fin, telles les considérations pascaliennes sur la situation de l'intelligence de l'homme dans le monde, s'appuyant sur des raisons qu'il croit comprendre d'expérience mais qui, s'il les interroge, se révèlent un puits sans fond[67].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ASHTEKHAR, A [1983]. Non Perturbative Quantum Gravity. A Status Report, in Cerdonio, M. & Rianci, R. (eds.), *General Relaativity and Gravitation*, World Scientific, Singapore, 1989.

AUDOUZE, Jean ; MUSSET, Paul & PATY, Michel (éds.), *Les particules et l'univers*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.

BAILLY, Francis [à paraître, a]. About the emergence of invariants in physics. From "substantial" conservation to formaal invariance, *in* Mugur-Schächter & Van der Merwe [à paraître].

BAILLY, Francis [à paraître, b]. Remarks about the program for a formal epistemology, *in* Mugur-Schächter & Van der Merwe [à paraître].

BARNES, Barry and BLOOR, David [1982]. Relativism, rationalism and the sociology of knowledge, *in* Hollis, Luckes (1982), p. 21-47.

BELL, John S. 1987. *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.

[66] Comme Poincaré le remarquait à propos du "choix des faits" significatifs (Poincaré [1908b].
[67] Pascal [1657].

BROWN, Laurie M., PAIS, Abraham & PIPPARD, Brian (eds.) [1995]. *Twentieth century physics*, 3 vols., Philadephia Institute of Physics, New York, 1995.

BUNGE, Mario [1973]. *Philosophy of physics*, Reidel, 1973 ; tr. fr., *Philosophie de la physique*, Paris, Seuil, 1975.

- [1983]. *Epistémologie*, Maloine, Paris, 1983.

CARNAP, Rudolf [1934]. *Die Aufgabe der Wissenschaftslogik*, Wien, 1934. Trad. fr., *Le problème de la logique de la science*, Hermann, Paris, 1935.

- [1950]. *Logical Foundations of Probability*, Chicago University Press, Chicago, 1950.

- [1966]. *Philosophical foundations of physics*, Basic books, New York, 1966. Trad. angl. par Jean-Jacques Luccioni et Antonia Soulez, *Les fondements philosophiques de la physique*, Armand Colin, Paris, 1973.

CASSIRER, Ernst [1910]. *Substanzbegriff und Funktionsbegriff*, Bruno Cassirer, Berlin, 1910. Trad. angl., *Substance and function*, *in* Cassirer 1923 (éd.1953), p.1-346.

- [1923]. *Substance and function and Einstein's theory of relativity*. Trad. angl. par William Curtis Swabey and Mary Collins Swabey, Open Court, Chicago, 1923; Dover, New York, 1953.

- [1923-1929]. *Philosophie der symbolischeen Formen*, 3 vols., Berlin, 1923, 1925, 1929). Trad. fr. par Ole Hansen-Love et Jean Lacoste, *La philosophie des formes symboliques*, Minuit, Paris, 1972, 3 vols.

CHANGEUX, Jean-Pierre [1983]. *L'homme neuronal*, Fayard, Paris, 1983.

CHANGEUX, Jean-Pierre & RICŒUR, Paul [1997]. *La nature et la règle. Ce qui nous fait penser*, Odile Jacob, Paris, 1997.

COHEN, Robert S., HORNE, Michael & STACHEL, John (eds.) [1997a]. *Experimental Metaphysics. Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony, Vol.. One*, Kluwer, Dordrecht, 1997.

- [1997b]. *Potentiality, Entanglement and passion-at-a-distance. Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony, Vol.. Two*, Kluwer, Dordrecht, 1997.

CUPANI, Alberto [1999]. Julgamento científico e racionalidade, *in* Dutra, Luis Henrique (ed.), *Nos limites da epistemologia analítica*, NEL, Florianopolis (Br), 1999, p. 139-159.

DAMASIO, Antonio R. [1994]. *Descartes' error. Emotion, Reason, and the Human Brain*, A.. Grosset, 1994. Trad. fr. par Marcel Blanc, *L'erreur de Descartes. La raison des émotions*, Odile Jacob, Paris, 1995.

DIRAC, Paul A. M. [1930]. *The Principles of Quantum Mechanics*, Clarendon Press, Oxford, 1930 ; 4th ed., rev., 1958 ; 1981.

EINSTEIN, Albert [1912]. Spezielle Relativitätstheorie (Manuscript on the Special Theory of Relativity, en allemand, non publié en raison de la guerre, préparé en 1912 pour le *Handbuch der Radiologie*, Erich Marx, ed., Leipzig. Manuscrit de 72 p., copie aux archives Einstein), *in* Einstein [1987-1998], vol. 4, p. 3-108.

- [1987-1998]. *The Collected Papers of Albert Einstein*, Edited by John Stachel, Martin Klein et al., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1987-1998, 8 vols. parus.

- [1989-1993]. *Oeuvres choisies*, Trad. fr. par le groupe de trad. de l'ENS Fontenay-St-Cloud *et al.*, édition publiée sous la dir. de Françoise Balibar. Seuil/éd. du CNRS, Paris, 6 vols., 1989-1993.

EINSTEIN, Albert, LORENTZ, Hendryk Antoon, MINKOWSKI, Hermann, WEYL,

Hermann [1922]. *Das relativitätsprinzip* (1ère éd. partielle, 1913), éd. par Arnold Sommerfeld4 ème éd., Teubner, Leipzig, 1922. Trad. angl. sur la 4 ème édition allemande, par W. Perrett and G.B. Jeffery : *The principle of relativity*, Methuen, London, 1923 ; Dover, New York, 1952.

EINSTEIN, Albert, PODOLSKY, Boris & ROSEN, Nathan [1935]. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ?, *Physical Review* , ser. 2, XLVII, 1935, 777-780. Trad. fr., Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète ?, *in* Einstein [1989-1993], vol. 1, p. 224-230.

D'ESPAGNAT, Bernard [1994]. *Le réel voilé. Analyse des concepts quantiques,* Fayard, Paris, 1994.

FOCILLON, Henri [1981]. *La Vie des Formes, suivi de Eloge de la main,* Presses Universitaires de France, Paris, 1981 ; réimpr., 1990.

FOUCAULT, Michel [1969]. *L'archéologie du savoir,* Gallimard, Paris, 1969.

GIERE, Ronald [1988]. *Explaining science. A cognitive approach*, The University of Chicago Press, Chicago, 1988.

GRANGER, Gilles Gaston [1968]. *Essai d'une philosophie du style*. Armand Colin, Paris, 1968 ; éd. revue, Odile Jacob, Paris, 1988.

- [1988]. *Pour la connaissance philosophique*, Odile Jacob, Paris, 1988.

- [1994]. *Formes, opérations, objets*, Vrin, Paris, 1994.

- [1995]. *Le probable, le possible et le virtuel*, Odile Jacob, Paris, 1995.

HADAMARD, Jacques [1945]. *An essay on the psychology of invention in the mathematical field*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), 1945. Trad. fr. par Jaqueline Hadamard, *Essai sur la psychologie de l'invention dans le domaine mathématique*, Gauthier-Villars, Paris, 1975.

HAHN, Hans, NEURATH, Otto, CARNAP, Rudolf [1929]. *Wissenschaftlische Weltauflassung der Wiener Kreis*, Wien, 1929. Reproduit *in* Neurath [1979], p. 81-101. [Voir Wiener Kreis.]

HAMILTON, William Rowland [1834]. On a general method in dynamics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1934 ; repr. *in* . Hamilton [1931-1967], vol. 2.

- [1931-1967]. *The Mathematical Papers of Sir W. R. H.*, Cambridge University Press, Cambridge, 3 vols., 1931, 1940, 1967.

JEFFREY, R. C. [1980]. *Studies in Inductive Logic and Probabilities*, 2 vols., University of California Press, Berkeley, 1980.

KANT, Immanuel [1781, 1787]. *Critik der reinen Vernunft*, J.F. Hartknoch, Riga, 1781; 2è éd., modifiée, 1787. Trad. fr. par Alexandre J.L. Delamarre et François Marty, *Critique de la raison pure*, *in* Kant, Emmanuel, *Oeuvres philosophiques*, vol. 1, Gallimard, Paris, 1980, p. 705-1470.

KOUNEIHER, Joseph [1998]. *Epistémologie et histoire récente de la gravitation quantique*, Thèse de doctorat en épistémologie et histoire des sciences, Université Paris 7-Denis Diderot, 17.12.1998.

LAGRANGE, Joseph Louis [1788]. *Mécanique analytique*, Desaint, Paris, 1788 ; 2ème éd., 1811. Repris in *Oeuvres complètes de Lagrange*, Gauthier-Villars, Paris, 18??, vol.?, p.-.

LAKATOS, Imre [1978]. *Philosophical papers, vol. 1: The methodology of scientific research programmes*, ed. by John Worrall and Gregory Currie, Cambridge University Press, Cambridge, 1978.

LAKATOS, Imre & MUSGRAVE, Alan (eds.) [1970]. *Criticism and the growth of*

knowledge. Proccedings of the International Colloquium in the philosophy of science, London, 1965, vol. 4, Cambridge University Press, Cambridge, 1970.

LALANDE, André [1980].*Vocabulaire technique et critique de la philosophie* (1926), 13è éd., Presses Universitaires de France, Paris, 1980 : articles Cause, Formalisme, Forme, Formel.

LANGEVIN, Paul [1911a]. L'évolution de l'espace et du temps, *Scientia* (Bologna) 10, 1911, 31-54 (conférence au Congrès de philosophie de Bologne, 1911). Repris *in* Langevin [1923], p. 265-300.

- [1911b]. Le temps, l'espace et la causalité dans la physique moderne, *Bulletin de la Société française de philosophie*, 12, 1911, 1-46. Repris *in* Langevin [1923], p. 301-344.

- [1923]. *La physique depuis vingt ans*, Doin, Paris, 1923.

LEVI-STRAUSS, Claude [1958]. *Anthropologie structurale*, Plon, Paris, 1958.

MARGENAU, Henry [1978]. *Physics and Philosophy : Selected Essays*, Redel, Dordrecht, 1978.

MINKOWSKI, Hermann [1907]. Das Relativitätsprinzip (exposé présenté à Göttingen le 5.11.1907, publication posthume, par les soins de Arnold Sommerfeld), *Annalen der Physik*, 47, 1915, 927-938.

- [1908]. Raum und Zeit [exposé présenté à la 80 ème assemblée des scientifiques et médecins allemands, Cologne le 21.9.1908], *Physikalische Zeitschrift* 10, 1909, 104-111. Trad. angl., Space and time, *in* Einstein *et al.* [1923],, p. 73- 91.

MUGUR-SCHÄCHTER, Miora [1993]. From Quantum Mechanics to Universal Structures of conceptualization and feedback on Quantum Mechanics, *Foundations of Physics* 23, 1993, 37-122.

- [1995]. Une méthode de conceptualisation relativisée : vers une épistémologie formelle apte à faire face aux complexités, *Revue Internationale de Systémique* 9, n°2, 1995, 269-303.

- [1996]. Les leçons de la mécanique quantique (vers une épistéomologie formelle), *Le Débat*, n° 94, 1996, 169-192.

MUGUR-SCHÄCHTER, Mioara & VAN DER MERWE, Alwyn (eds.), *From Quantum-Mechanics Toward a Formalized Epistemology,* Kluwer Academic Press, à paraître.

NEUMANN, John von [1932]. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer, Berlin, 1932. Trad. fr. par Alexandre Proca, *Les fondements mathématiques de la mécanique quantique*, Librairie Alcan et Presses universitaires de France, Paris, 1947.

NŒTHER, Emmy [1918a]. Invarianten beliebiger Differentialausdrücke, *Nachr. von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaft zu Göttingen, Math. Phys. Klasse,* 1918, 235-257 ; repris *in* Nöether [1983], p. 240-247.

- [1918a]. Invariante variationprobleme, *ibid*, 1918, 235-257 ; repris *in* Nöether [1983], p. 248-270 ; trad. angl. par M. A. Tavel, *Transport Theory and Statistical Physics* 1, 1971, 183-207.

- [1983]. *Collected Papers*, ed. by N. Jacobson, Springer-Velag, Berlin, 1983.

OULIPO (Ouvroir de Littérature potentielle) [1977]. *Littérature potentielle : créations, re-créations, récréations*, Gallimard, Paris, 1977.

PASCAL, Blaise [1657]. De l'esprit géométrique (1657), *in* Pascal, *Oeuvres complètes*, Présentation et notes de Louis Lafuma, Seuil, Paris, 1993, p. 348-355.

PATY, Michel [1986]. La non-séparabilité locale et l'objet de la théorie physique, *Fundamenta Scientiae* 7, 1986, 47-87.

- [1988a]. *La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Archives contemporaines, Paris, 1988

- [1988b]. Sur la notion de complétude d'une théorie physique, *in* Fleury, Norbert; Joffily; Sergio; Martins Simões, J.A. and Troper, A. (eds), *Leite Lopes Festchrift. A pioneer physicist in the third world* [dedicated to J. Leite Lopes on the occasion of his seventieth birthday], World scientific publishers, Singapore, 1988, p. 143-164.

- [1990]. *L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique (sciences, philosophie, épistémologie, histoire des sciences)*, L'Harmattan, Paris, 1990, 222p.

- [1992]. L'endoréférence d'une science formalisée de la nature, *in* Dilworth, Craig (ed.), *Intelligibility in science*, Rodopi, Amsterdam, 1992, p. 73-110.

- [1993]. *Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1993, 584 p.

- [1994a]. Mesure, expérience et objet théorique en physique, *in* Beaune, Jean-Claude (dir.), *La mesure, instruments et philosophies*, Champ Vallon, Seyssel (01), 1994, p. 159-174.

- [1994b]. Le caractère historique de l'adéquation des mathématiques à la physique, *in* Garma, Santiago; Flament, Dominique; Navarro, Victor (eds.), *Contra los titanes de la rutina.- Contre les titans de la routine [Encuentro en Madrid de investigadores hispano-franceses sobre la historia y la filosofia de la matematica Rencontre à Madrid de chercheurs hispano-français sur l'histoire et la philosophie de la mathématique,18-22.11.1991]*, Comunidad de Madrid/C.S.I.C., Madrid, 1994, p. 401-428.

- [1994c]. Sur l'histoire du problème du temps: le temps physique et les phénomènes, *in* Klein, Etienne et Spiro, Michel (éds.), *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1994, p. 21-58; 2è éd., 1995 ; Collection Champs, Flammarion, Paris, 1996, p. 21-58.

- [1995]. The nature of Einstein's objections to the Copenhagen interpretation of quantum mechanics, *Foundations of physics* 25, 1995, n°1 (january), 183-204.

- [1996a]. Poincaré et le principe de relativité, *in* Greffe, Jean-Louis; Heinzmann, Gerhard et Lorenz, Kuno (éds.), *Henri Poincaré. Science et philosophie. Science and philosophy. Wissenscchaft und Philosophie. Congrès international, Nancy, France, 14-18 mai 1984*, Akademie Verlag, Berlin/Albert Blanchard, Paris, 1996, p. 101-143.

- [1996b]. Le style d'Einstein, la nature du travail scientifique et le problème de la découverte, *Revue philosophique de Louvain*, 94, 1996 (n°3, août), 447-470. R

- [1997]. Predicate of existence and predictivity for a theoretical object in physics, *in* Agazzi, Evandro (ed.), *Realism and Quantum Physics*, Rodopi, Amsterdam, 1997, p. 97-130. [Trad. en anglais, par M.P., avec modific., de 1993g]. R

- [1998]. Philosophie et physique, *in* Jean-François Mattéi (éd.), *Le Discours philosophique*, volume 4 de l'*Encyclopédie philosophique universelle*, Presses Universitaires de France, Paris, 1998, chap. 123, p. 2104-2122.

- [1999a]. L'universalité de la science. Une idée philosophique à l'épreuve de l'histoire, *Mâat. Revue Africaine de Philosophie*, 1ère année, n° 1, avril 1999, 1-26. Version angl. : Universality of Science : Historical Validation of a Philosophical Idea, as Chapter 12, *in* Habib, S. Irfan and Raina, Dhruv (eds.), *Situating the history of science : Dialogues with Joseph Needham*, Oxford University Press (New Delhi), 1998, p. 303-324.

- [1999b]. La place des principes dans la physique mathématique au sens de Poincaré, *in* Sebestik, Jan et Soulez, Antonia (éds.), *Actes du Colloque France-*

Autriche Paris, mai 1995, Interférences et transformations dans la philosophie française et autrichienne (Mach, Poincaré, Duhem, Boltzmann), Fundamenta philosophiæ (Nancy) 3 (2), 1998-1999, 61-74.

- [1999c]. Cosmologie et matière quantique, *in* Seidengart, Jean et Sczeciniarz, Jean-Jacques (éds.), *Cosmologie et philosophie. En hommage à Jacques Merleau-Ponty, Epistémologiques* (Paris, São Paulo) 1 (n°1-2), 1999, -.

- [1999d]. Interprétations et significations en physique quantique, *Revue Internationale de philosophie*, 1999, sous presse.

- [1999e]. La création scientifique selon Poincaré et Einstein, *in* Serfati, Michel (éd.), *La recherche de la vérité*, Coll. Ecriture des Mathématiques, éditions ACL, Paris, 1999, p. 239-278.

- [1999f]. Paul Langevin (1872-1946), la relativité et les quanta, *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 119, mai 1999, 15-20.

- [1999g]. Langevin, Poincaré et Einstein, *in Paul Langevin, son œuvre et sa pensée*, *Epistémologiques. Philosophie, sciences, histoire* (Paris, São Paulo), n°3-4, 1999 (numéro sur *Paul Langevin*, sous presse).

- [1999h]. Are quantum systems physical objects with physical properties ?, *European Journal of Physics*, 20, 1999 (nov.), 373-388.

- [à paraître, a]. The concept of quantum state : new views on old phenomena, *in* Cohen, Robert S. & Renn, Jürgen (ed.), *John Stachel Festschrift*, Boston Studies in the Philosophy and History of science, Kluwer, Dordrecht, à paraître. (Le concept d'état quantique : un nouveau regard sur d'anciens phénomènes.)

- [à paraître, b]. The quantum and the classical domains as (provisional) parallel coexistents, in Krause, Décio ; Doria, Francisco & Bueno, Otávio (eds.), A volume in honour of Newton da Costa, to be published. (Le quantique et le classique, ou les (provisoires) coexistants parallèles).

- [à paraître, c]. The Idea of Quantity at the Origin of the Legitimacy of Mathematization in Physics, *in* Gould, Carold (ed.), *Conference on the philosophy of Marx Wartofsky*, New School University, New York, march 6th 1999, New York.Version française : La notion de grandeur et la légitimité de la mathématisation en physique, *Deuxième Journée de Philosophie des Sciences Jean Largeault*, Universités de Paris-Sorbonne (Paris-4), Paris 1-Panthéon-Sorbonne, Marc Bloch-Strasbourg-2 et Institut Universitaire de France, Vendredi 7 Mai 1999.

- [à paraître, d]. L'analogie mathématique au sens de Poincaré et sa fonction en physique, *in* Durand-Richard, Marie-José (éd.), *Le statut de l'analogie dans la démarche scientifique*, Editions du CNRS, Paris, à paraître.

- [à paraître, e]. *Einstein, les quanta et le réel. Critique et construction théorique*.

- [à paraître, f]. Trois sens pour la notion de complétude en physique, Séminaire du CESEF, Paris, 28 octobre 1999.

PEREC, Georges [1969]. *La disparition*, Denoël, Paris, 1969 ; Gallimard, Paris, 1989.

POINCARE, Henri [1897]. Sur les rapports de l'analyse pure et de la physique mathématique, *Acta mathematica* 21, 1897, 331-341 ; republié dans Poincaré [1991], p. 17-30. Egalement paru, avec des modifications, sous le titre "Les rapports de l'analyse et de la physique mathématique", *Revue générale des sciences pures et appliquées* 8, 1897, 857-861 ; repris dans Poincaré 1905 [chapitre 5 : "L'analyse et la physique"], éd. 1970, p. 103-113.

- [1905b]. Sur la dynamique de l'électron (adunanza del 23 luglio 1905 [reçu le 23 juillet 1905]), *Rendiconti del Circolo matematico di Palermo* XXI, 1906, p. 129-176. Egalement *in* Poincaré 1950-1965, vol. 9, p. 494-550.

- [1908a]. *Science et méthode*, Flammarion, Paris, 1908 ; 1918.

- [1908b]. Le choix des faits, *The Monist*, 1909, 231-232. Publié dans Poincaré [1908a], livre 1, chap. 1, éd. 1918, p. 16-18.

- [1912]. L'espace et le temps, *Scientia* 12 ème année, vol. XXV, 1912, 159-170 [Conférence faite le 4 mai 1912 à l'Université de Londres]. Egalement *in* Poincaré 1913, éd. 1963, p. 97-109.

- [1913]. *Dernières pensées* , Flammarion, Paris, 1913 ; réed. 1963.

- [1950-1965]. *Oeuvres*, Gauthier-Villars, Paris, 11 vols., 1950-1965.

- [1991]. *L'analyse et la recherche*, choix de textes et introduction de Girolamo Ramunni, Hermann, Paris, 1991.

POPPER, Karl [1935]. *Logik der Forschung. Zur Erkenntnisstheorie der modernen Naturwissenschaft*, Springer Verlag, Wien, 1934. Ré-éd. avec additions, 1966. Engl. transl., *The logic of scientific discovery*, 1968. Trad. fr. par Nicole Thyssen-Rutten et Philippe Devaux, *La logique de la découverte scientifique* , Payot, Paris, 1973.

- [1972]. *Objective knowledge, an evolutionary approach*, Clarenson Press, Oxford, 1972. Trad. fr. par C. Bastyns, *La connaissance objective* , Complexe, Bruxelles, 1978. [La traduction française ne comporte que les trois premiers chapitres.]

- [1982]. *Quantum theory and the schism in physics, from the Postscript to the logic of scientific discovery* , vol. 3, Hutchinson, London, 1982. [Rédigé en1956].

- [1983]. *Realism and the aim of science, from the Postscript to the logic of scientific discovery, vol. 1*, édité par W. W. Bartley III, Hutchinson, London, 1983. [Rédigé en1956]. Trad. fr. par Alain Boyer et Daniel Andler, Hermann, Paris, 1990.

PROUST, Joëlle [1986]. *Questions de forme. Logique et proposition analytique de Kant à Carnap*, Fayard, Paris, 1986.

REICHENBACH, Hans [1938]. *Experience and prediction*, University of Chicago Press, Chicago, 1938.

- [1951]. *The rise of scientific philosophy* , University of California Press, Berkeley, 1951; ré-ed. 1973. Trad. fr., *L'avènement de la philosophie scientifique*, Flammarion, Paris, 1955.

- [1959]. *Modern philosophy of science*, Edited and translated by Maria Reichenbach, Routledge and Kegan Paul, London, 1959.

- [1978]. *Selected writings*, edited by Robert S. Cohen and Maria Reichenbach, 2 vols, Reidel, Dordrecht, 1978.

RUELLE, David [1989]. *Chaotic Evolution and Strange Attractors*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

- [1991]. *Hasard et chaos*. Trad. angl., *Chance and chaos*, Princeton Uniersity Press, Princeton, 1991

SHIMONY, Abner [1993]. *Search for a naturalistic world view*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993, 2 vols.

SOULEZ, Antonia (éd.) [1986]. *Manifeste du Cercle de Vienne et autres écrits : Carnap, Hahn, Neurath, Schlick, Waissmann, Wittgenstein*, Presses Universitaires de France, Paris, 1986.

STEGMULLER, Wolfgang [1973]. *Probleme und Resulate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie. Band 2 : Theorie und Erfahrung. Zweiter Halbband : Theoriestrukturen und Theoriendynamik*, Springer-Verlag, Heidelberg, 1973.

- [1979]. *The Structuralist View of Theories. A Possible Analogue of the Bourbaki Programme in Physical Science,* Springer-Verlag, Heidelberg, 1979.

VEYNE, Paul [1971]. *Comment on écrit l'histoire,* Seuil, Paris, 1971.

- [1978]. Foucault révolutionne l'histoire, *in Comment on écrit l'histoire et Foucault révolutionne l'histoire*, Seuil, Paris, 1978.

WALTER, Scott [1996]. *Hermann Minkowski et la mathématisation de la théorie de la relativité, 1905-1915,* le 20.12.1996.

WARTOFSKY, Marx [1968]. *Conceptual foundations of scientific thought. An introduction to the philosophy of science,* Mac Millan, London, 1968.

WEYL, Hermann [1928]. *Gruppentheorie und Quantenmechanik*, Hirzel, Leipzig, 1928 (2ème éd. 1931). Trad. angl. by H. P. Robertson, *The theory of groups and quantum mechanics*, Methuen, London, 1931; Dover, New York, 1950.

WHEELER, John A. & ZUREK, Wojcieh H. (eds.) [1983]. *Quantum theory of measurement* , Princeton University Press, Princeton, 1983.

WIENER KREIS [1929]. *Wissenschaftliche Weltaufflassung: der Wiener Kreis*, A. Wolf, Wien, 1929. Re-publié *in* Neurath [1979], p. 81-101. [Préface par Hans Hahn, Otto Neurath, Rudolf Carnap]. Trad. fr. : La conception scientifique du monde : le Cercle de Vienne, *in* Soulez [1986], p. 108-151.

ZAHAR, Elie [1989]. *Einstein's revolution. A Study in Heuristic,* Open Court, La salle (Ill.), 1989.

- [1994]. Againts the (alleged) divorce between science and philosophy. Comments on M. Paty's *La matière dérobée*, *Rivista di Storia della Scienza,* ser. II, 1994, 2, (n°1, giugno), 191-208.